

**ENMIENDAS DE BAJO COSTE PARA  
MEJORAR EL TRATAMIENTO DE AGUA  
RESIDUAL: MODELIZACIÓN NUMÉRICA  
E INTERPRETACIÓN DE DATOS**

**LOW COST SOIL AMENDMENTS TO  
IMPROVE WASTEWATER TREATMENT:  
NUMERICAL MODELLING AND DATA  
ANALYSIS**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**D./D<sup>a</sup> VICTORIA CAROLINA UNAPANTA ALBÁN**

**Dirigido por:**

**Dra. RAFFAELLA MEFFE y VIRTUDES MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**

**Alcalá de Henares, a 3 de junio de 2019**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
3. METODOLOGÍA .....	3
3.1. Teoría de la modelización.....	3
3.1.1. Flujo de agua en la zona no saturada.....	5
3.1.2. Transporte de masa en la zona no saturada .....	6
3.2. Programa Hydrus 1D .....	8
3.3. Descripción del experimento en las columnas.....	8
3.4. Simulación de suelo .....	9
3.4.1. Parámetros hidráulicos del suelo: curva de retención .....	9
3.4.2. Discretización del tiempo y del espacio .....	10
3.4.3. Modelo de flujo estacionario .....	11
3.4.4. Modelo de flujo .....	11
3.4.5. Modelo de transporte conservativo .....	12
3.5. Simulación de suelo enmendado con astillas de madera .....	13
3.5.1. Parámetros hidráulicos .....	13
3.5.2. Discretización del tiempo y del espacio .....	13
3.5.3. Modelo de flujo de agua .....	14
3.5.4. Modelo de flujo estacionario .....	15
3.5.5. Modelo de transporte conservativo .....	15
4. RESULTADOS.....	16
4.1. Parámetros hidráulicos del suelo .....	16
4.1.1. Curva de retención.....	16
4.2. Parámetros hidráulicos del suelo enmendado .....	17
4.3. Transporte conservativo.....	19
4.3.1. Trazador y dispersividad longitudinal .....	19
4.3.2. Conductividad hidráulica saturada .....	21
4.3.3. Tiempo de retención en las columnas .....	24
4.4. Eliminación de nutrientes .....	24
4.4.1. Nitrógeno.....	24
4.4.2. Fósforo.....	26

5. DISCUSIÓN .....	27
5.1. Modelo de flujo y transporte conservativo .....	27
5.1. Eliminación de nutrientes .....	29
6. CONCLUSIONES .....	31
7. BIBLIOGRAFÍA.....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Curva de retención .....	17
<b>Figura 2.</b> Tensiómetros calibrados con diferentes texturas .....	18
<b>Figura 3.</b> Diagrama triangular de las clases texturales (Tomado de FAO; 2019) .....	19
<b>Figura 4.</b> Calibración del trazador para la columna de suelo .....	20
<b>Figura 5.</b> Calibración del trazador para la columna enmendada .....	20
<b>Figura 6.</b> Calibración de tensiómetros con conductividad hidráulica para la columna de suelo.....	22
<b>Figura 7.</b> Calibración de tensiómetros con conductividad hidráulica de la columna enmendada.....	23
<b>Figura 8.</b> Concentración de nitrógeno total influente y efluentes .....	25
<b>Figura 9.</b> Concentración de nitrato en influente y efluentes.....	25
<b>Figura 10.</b> Concentración de DQO en influente y efluentes .....	26
<b>Figura 11.</b> Concentración de fosfato en influente y efluentes .....	27

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características de las columnas .....	9
<b>Tabla 2.</b> Presión y contenido de agua para la curva de retención.....	10
<b>Tabla 3.</b> Porcentajes texturales para la columna de suelo .....	10
<b>Tabla 4.</b> Discretización del tiempo para la columna de suelo .....	11
<b>Tabla 5.</b> Condiciones de contorno para la columna de suelo .....	12
<b>Tabla 6.</b> Discretización del tiempo para la columna enmendada .....	13
<b>Tabla 7.</b> Condiciones de contorno para la columna enmendada .....	14
<b>Tabla 8.</b> Condiciones de contorno en el modelo de transporte de la columna enmendada.....	16
<b>Tabla 9.</b> Parámetros hidráulicos de la columna de suelo.....	17
<b>Tabla 10.</b> Parámetros hidráulicos de diferentes texturas para la columna enmendada .....	18
<b>Tabla 11.</b> Volumen de agua drenada con la Ks de Rosetta .....	19

<b>Tabla 12.</b> Volumen de agua drenado con Ks calibrada en el modelo de flujo .....	21
<b>Tabla 13.</b> Volumen de agua drenado con Ks calibrada en el modelo de transporte....	22
<b>Tabla 14.</b> Volumen de agua drenado con Ks calibrada en el modelo de transporte....	23
<b>Tabla 15.</b> Calidad del influente y efluentes (nitrógeno) .....	24
<b>Tabla 16.</b> Calidad del influente y efluentes (fósforo) .....	26

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

BC: Condiciones de contorno

l: Conectividad entre poros

$\theta_s$ : Contenido de agua saturado ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\theta_r$ : Contenido de agua residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

Ks: Conductividad hidráulica saturada ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L)

$\alpha_L$ : Dispersividad longitudinal (cm)

$R^2$ : Error cuadrático medio

NT: Nitrógeno total (mg/L)

PT: Fósforo total (mg/L)

## RESUMEN

El agua residual, que contiene nutrientes, puede ser aprovechada por las plantas para su crecimiento. Sin embargo, esta carga de nutrientes podría infiltrarse y contaminar los flujos de aguas subterránea.

En el presente trabajo se estudia la eficacia de las enmiendas de bajo coste, como una alternativa para mejorar el tratamiento de agua residual y evitar la lixiviación de estos nutrientes al agua subterránea.

Para ello, a escala de laboratorio se regaron 500 ml de agua residual con nutrientes en dos columnas, una rellena de suelo y otra de suelo enmendado con astillas de madera. Este riego se realizó en dos tandas, una vez por semana durante 3 meses. Los datos obtenidos en laboratorio se cuantificaron a través de una modelización numérica con el programa Hydrus 1D. Este software permitió simular el comportamiento del flujo de agua y el transporte de un trazador de ( $\text{Cl}^-$ ).

El registro continuo del contenido de agua en el tiempo se realizó, en términos de presión, mediante un tensiómetro ubicado en las columnas de 15,20 cm y 17,80 cm de altura de suelo y suelo enmendado respectivamente.

El trabajo se inició con la determinación de los parámetros hidráulicos para cada columna en la simulación de un modelo de flujo. Los resultados de presión de este modelo de flujo son las condiciones de entrada para el transporte del trazador. En la simulación de transporte de trazador se calibró la dispersividad longitudinal y la conductividad hidráulica. Con estos resultados fue posible determinar los tiempos de retención y el comportamiento del agua en el suelo de las dos columnas.

Finalmente, se realizaron 12 muestreos de los efluentes de cada columna para analizar el porcentaje de eliminación de compuestos de nitrógeno y fósforo.

Los resultados de concentración de nitrógeno total en el efluente de la columna de suelo, muestran que incremento en 2,25%, mientras que en la columna enmendada redujo en 83,54%. Lo que indica la eficiencia de eliminación de nitrógeno con la presencia de astillas de madera. En cuanto al porcentaje de eliminación de fósforo total, se obtuvo para la columna de suelo una reducción de 96,75% y para el suelo enmendado fue de 96,93%. Estos resultados muestran el descenso de concentración independientemente de la presencia de astillas de madera.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la depuración de aguas residuales es primordial, ya que con el pasar del tiempo la demanda de agua incrementa y con ello el volumen de agua residual. Esto ha incentivado la búsqueda de nuevas tecnologías de bajo coste que integren la optimización de los recursos, la protección al medio ambiente y la salud pública.

Dentro de estas estrategias de tratamiento se encuentran la reutilización y regeneración de aguas residuales, cuyo objetivo es la recuperación de compuestos como los nutrientes, el aprovechamiento del agua en la producción de alimentos, la recarga de acuíferos, entre otros (Álvarez, 2000).

Adicionalmente, la comunidad científica se está enfocando en la implantación de tecnologías no convencionales o filtros verdes, como sistemas de depuración previo a tratamientos primarios o secundarios. Estas tecnologías según Álvarez (2000), son sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales, constituidos por especies vegetales sobre una superficie de terreno, en las cuales se aplica agua residual mediante algún método de riego. Es importante que se asegure que dicho riego no genere contaminación a las fuentes de agua subterránea ni superficiales.

Además, los filtros verdes son considerados de bajo coste, ya que la implementación y mantenimiento son reducidos en comparación con las tecnologías convencionales para el tratamiento de efluentes de aguas residuales (Ruane et. al., 2011). Este tipo de técnicas pueden utilizarse en pequeñas poblaciones, ya que están limitadas por el volumen de agua residual a tratar y la superficie de terreno disponible para el tratamiento (Ortega et. al., 2008).

Dentro de estas tecnologías se encuentran las enmiendas naturales como restos de madera o materia orgánica en el suelo, que se incorporan al suelo funcionando como un tratamiento físico, químico y biológico (Catalán, 1997). Las astillas de madera son una fuente de carbono orgánico extra, que fomenta actividad microbiana llevándose a cabo conversiones de nitrificación y desnitrificación (Meffe et. al., 2016). Además, existen otros estudios sobre eliminación de contaminantes emergentes con estos filtros.

Es importante mencionar que las astillas de madera son un material diferente que puede incrementar la diversidad de lugares de adsorción en el suelo. Por otro lado, su

incorporación al suelo puede modificar las propiedades hidráulicas como la conductividad hidráulica, la dispersividad longitudinal y los tiempos de retención.

En el presente estudio, mediante el software Hydrus se realizó la simulación de una columna de suelo franco arcilloso arenoso y otra columna del mismo suelo enmendado con astillas de madera. El objetivo de esta simulación es determinar la efectividad de las enmiendas naturales para mejorar el tratamiento de aguas residuales con nutrientes en filtros verdes.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Investigar la efectividad de las astillas de madera como enmiendas de bajo coste en el suelo para mejorar el tratamiento de aguas residuales con nutrientes.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar las propiedades hidráulicas de una columna de suelo y otra de suelo enmendado con astillas de madera mediante la modelización numérica utilizando el software Hydrus-1D.
- Simular un modelo de flujo de agua en condiciones estacionarias y un modelo de transporte conservativo mediante el uso de un trazador ( $\text{Cl}^-$ ), con la finalidad de calibrar la conductividad hidráulica y la dispersividad longitudinal.
- Analizar e interpretar el comportamiento de nutrientes en los efluentes obtenidos de cada columna de laboratorio frente a la concentración de estos compuestos presentes en el agua residual de riego (influyente).

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Teoría de la modelización**

El agua se mueve en la zona no saturada de zonas de mayor a menor energía hasta encontrar el equilibrio entre las distintas fuerzas que actúan sobre un punto. La energía potencial es distinta de un punto a otro en el suelo y esta diferencia origina el desplazamiento del agua (Martínez et. al., 2006). Por un lado, actúa la fuerza de la gravedad que arrastra a mayor profundidad y, por otro lado, las fuerzas de retención que fijan las moléculas de agua a las partículas del suelo.

El potencial gravimétrico es la energía generada por la fuerza de la gravedad y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$E_G = \rho \cdot g \cdot z \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde la densidad de agua  $\rho$  [M/L<sup>3</sup>] es masa sobre unidad de volumen (m/V), la aceleración de la gravedad  $g$  [L/T<sup>2</sup>] y la cota respecto al plano de referencia  $z$  [L].

La energía que genera las fuerzas de retención se denomina potencial de succión y está compuesta por el potencial osmótico y el potencial matricial.

El potencial osmótico se encuentra en terrenos salinos donde la fase sólida atrae a las moléculas de fase líquida para igualar la concentración de sal, generalmente es despreciable si la concentración de los solutos es baja (Martínez et. al., 2006).

En cuanto al potencial matricial, éste se define como la suma entre el potencial de adsorción y el potencial capilar. El potencial de adsorción se define como la energía por la cual los enlaces electrostáticos se unen a las moléculas de agua, dando lugar a la formación de una película sobre la superficie del coloide. El potencial capilar es la fuerza que provoca el ascenso del agua en poros pequeños, donde la presión es menor que la atmosférica.

La suma del potencial gravimétrico y el potencial de succión o matricial (si se desprecia el osmótico) se denomina potencial hídrico o de presión. Este potencial se puede medir experimentalmente por un instrumento denominado tensiómetro que expresa las medidas en unidades de presión. Dicho potencial se define mediante la siguiente ecuación:

$$\phi = \Psi(\theta) + E_G \quad \text{ó} \quad \phi = P_m + \rho \cdot g \cdot z \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde  $\phi$  es el potencial hídrico,  $\theta$  [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>] representa el volumen de agua que contiene un volumen de zona no saturada, es decir, el contenido de agua. El potencial matricial  $\psi$  depende de  $\theta$  y para mejor entendimiento se le denomina según la abreviatura  $P_m$  (Martínez et. al., 2006). Si a estas variables se las divide entre la densidad del agua  $\rho$  y la gravedad  $g$  se obtiene:

$$\phi = \frac{P_m}{\rho \cdot g} + z \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Que puede expresarse como:

$$\phi = h_m + z \quad \text{Ecuación 3.4}$$



Según expresa Martínez et. al., (2006), esta ecuación define el potencial hídrico  $\phi$ , como la suma del potencial matricial  $h_m$  en unidades de longitud [L H<sub>2</sub>O] más la cota del punto que se mide con respecto a un plano de referencia.

La curva de retención de agua en la zona no saturada fue definida por Van Genuchten (1980) como la relación entre el potencial matricial  $h_m$  y el contenido de agua  $\theta$ , expresado mediante la siguiente fórmula:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\Psi|)^n]^m} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$n = \frac{1}{1 - m} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$\alpha = \frac{(2^{1/m} - 1)^{1-m}}{h_d} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde  $h_d$  es el potencial matricial en el que inicia el drenaje por gravedad,  $\theta_r$  es el contenido de agua residual, también conocida como la humedad residual no eliminable en el terreno,  $\theta_s$  es el contenido de agua saturado,  $\alpha$  es el valor de entrada de aire,  $n$  representa la distribución de tamaños de poro y  $m$  es un parámetro de ajuste de la curva característica del suelo.

### 3.1.1. Flujo de agua en la zona no saturada

La ecuación 3.8 define el movimiento del agua en la zona no saturada descrito por la ley de Buckingham y expresada actualmente por Richards:

$$q = -K(\Psi) \frac{\partial \Phi}{\partial l} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

En la cual se define que el caudal de agua a través de una unidad de superficie  $Q/A$  [ $L^3/T \cdot L^2$ ] depende de la conductividad hidráulica  $K(\psi)$ , que depende a su vez del potencial matricial [ $L/T$ ], y del gradiente  $\frac{\partial \Phi}{\partial l}$ , es decir, de la variación de energía total del agua a largo de un camino recorrido. Finalmente, el signo negativo indica el movimiento vertical descendente (Martínez et. al., 2006).

Según Martínez et. al., (2006), la conductividad hidráulica en la zona no saturada es función del contenido de agua  $\theta$ , y, como el potencial matricial también depende de este, se puede concluir que la conductividad depende del potencial matricial  $\psi$ .

Adicionalmente, Van Genuchten (1980) desarrolló la ecuación que incluye la conductividad y el contenido de agua en el terreno como se muestra a continuación:

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^{1/2} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

La variable  $K(\theta)$  es la conductividad hidráulica en función del contenido de humedad  $\theta$ ,  $K_s$  es la conductividad hidráulica para el medio totalmente saturado y  $m$  es un parámetro definido para la curva característica del suelo. La ecuación 3.10 define  $S_e$  en función de los contenidos de agua.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

La relación entre conductividad no saturada y el potencial de presión se describe en la siguiente ecuación:

$$K(h) = K_s \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde  $K(h)$  conductividad hidráulica en la zona no saturada para un potencial de presión  $h$  y  $m$ ,  $n$  y  $\alpha$  son las variables dependientes de la curva de retención de agua.

Finalmente, la ecuación de continuidad está expresada para un intervalo de tiempo, donde el balance de agua, (entradas menos las salidas de agua), son iguales a la variación del volumen de agua almacenado en la zona no saturada:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\psi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

### 3.1.2 Transporte de masa en la zona no saturada

El transporte de masa en la zona no saturada depende de varios factores tales como: el contenido de agua en los poros, la difusión molecular y la dispersión mecánica.

Según expresa Sánchez (2017), la difusión molecular se define como el proceso por el cual las moléculas se mueven de una zona de mayor a menor concentración, depende de factores como: la tortuosidad, las fuerzas electrostáticas y la humedad del suelo, dando lugar a un coeficiente de difusión que se expresa mediante la segunda ley de Fick como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right) = D(\theta) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial C}{\partial z} \cdot \frac{\partial D(\theta)}{\partial z} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde  $D(\theta)$  es el coeficiente de difusión molecular en la zona no saturada [ $L^2/T$ ],  $C$  la concentración del contaminante [ $M/L^3$ ],  $t$  tiempo [ $T$ ] y  $z$  dirección del movimiento del soluto.

La dispersión mecánica se produce al ingresar un fluido en el medio poroso donde las partículas no se mueven uniformemente, ya que depende de la textura, la estructura, el contenido de agua en el suelo y de la velocidad. En la ecuación se define con un coeficiente de dispersión mecánica.

Según Martínez et. al., (2006), el coeficiente de difusión molecular y el coeficiente de dispersión mecánica se integran en uno solo y se denomina el coeficiente de dispersión hidrodinámica ( $D_h$ ), definida por la ley de Fick en la ecuación 3.14.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_h(\theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right) = D_h(\theta) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial C}{\partial z} \cdot \frac{\partial D_h(\theta)}{\partial z} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Además, el transporte de los contaminantes por el hecho del propio movimiento del agua se define como transporte advectivo. Por tanto, el flujo de masa que circula a través de una unidad de superficie que depende del contenido de agua  $v(\theta)$  [ $L/T$ ] y de la concentración del soluto en el agua  $C$  [ $M/L^3$ ] se define mediante la siguiente ecuación:

$$F_{adv} = v(\theta) \cdot C \quad \text{Ecuación 3.15}$$

El flujo total de la masa que circula por una unidad de superficie es la suma del transporte de dispersión hidrodinámica y del transporte advectivo:

$$F_T = D_h(\theta) \frac{\partial C}{\partial z} + v(\theta) \cdot C \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Para realizar un balance de masa a partir de esta ecuación expresada para un tiempo  $dt$ , considerando la dirección vertical, se llega al principio de la conservación de la masa. En la ecuación 3.1, las variables del costado izquierdo muestran la variación de la masa en un intervalo de tiempo y los términos de la derecha indican la diferencia de entrada y salida de masa en un intervalo de tiempo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_h(\theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial [v(\theta) \cdot C]}{\partial z} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

### **3.2. Programa Hydrus 1D**

El software Hydrus-1D, es un programa de libre acceso unidimensional de elementos finitos. Hydrus-1D permite simular flujos de agua, calor y solutos, en medios porosos saturados y no saturados. El programa resuelve mediante métodos numéricos la ecuación de Richards.

La determinación de los parámetros característicos de la curva de retención se puede llevar a cabo mediante dos formas. La primera sería utilizando el programa RETC simulando la curva que represente las medidas de contenido de humedad a diferentes presiones, que se pueden obtener experimentalmente utilizando las placas de Richards. La segunda forma sería utilizando las funciones de pedotransferencia (PTF) del módulo Rosetta-Lite de Schaap et al. (2001), el cual contiene 5 niveles o modelos. A medida que incrementa el nivel se requiere de mayor información. Esta información varía desde los porcentajes texturales hasta el contenido de agua a presiones de 33 KPa y 1500 KPa (Radcliffe y Simunek, 2010).

Par el presentes estudio para la columna de suelo se utilizó la primera opción con datos experimentales medidos con las placas de Richard. En el caso del suelo enmendado con astillas de madera, debido a la ausencia de estos datos, se utilizó la segunda opción.

En el presente estudio, el software Hydrus 1D permitió simular el flujo de agua y transporte no reactivo del soluto en el medio poroso de las columnas de laboratorio. Es importante mencionar que se trabajó en términos de presión.

### **3.3. Descripción del experimento en las columnas**

Para alcanzar el objetivo propuesto, se llevaron a cabo dos experimentos en columnas de acero inoxidable a escala laboratorio. Las columnas simulaban la infiltración a través del suelo en un filtro verde a escala piloto que trata el agua residual procedente de un edificio de oficinas. Para ello, se elaboró agua residual sintética con la misma calidad que el agua residual real con contenido de nutrientes, se utilizó el mismo suelo del filtro verde y se estableció el mismo patrón de riego que en el ensayo piloto.

En concreto, se simuló una columna de suelo y una columna de suelo con una enmienda de astillas de madera. Cada columna se regó con 500 ml en dos tandas de 250 ml una vez a la semana. Las características de estas columnas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Características de las columnas

<b>Parámetros</b>	<b>Suelo</b>	<b>Suelo + astillas de madera</b>
Diámetro de la columna (cm)	8,49	8,49
Área (cm <sup>2</sup> )	56,75	56,75
Volumen (cm <sup>3</sup> )	862,52	1010,06
Altura de la columna (cm)	15,20	17,80
Densidad aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	1,55	1,36
Porosidad total (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0,3282	0,4296

Además, se realizó un ensayo de trazador o también conocido como transporte de un contaminante no reactivo o conservativo. Para este modelo se efectuó dos riegos en un día cada uno de 250 ml de agua con una disolución de  $\text{Cl}^-$  a una concentración de 5 g/l como trazador. A partir de este evento, se continua el riego normal únicamente con agua sintética cada miércoles hasta cumplirse un total de 21 días. Posteriormente, a la salida de la columna se analiza la concentración de llegada del trazador ( $\text{Cl}^-$ ).

Los valores medidos para determinar la llegada de  $\text{Cl}^-$  fueron la conductividad eléctrica y la concentración de trazador a la salida de la columna

Finalmente, con el objetivo de analizar la atenuación de los nutrientes del agua residual sintética utilizada para el riego, se realiza el muestreo de sus efluentes durante cada riego.

### **3.4. Simulación de suelo**

#### **3.4.1. Parámetros hidráulicos del suelo: curva de retención**

Los parámetros hidráulicos del suelo se obtuvieron mediante la curva de retención de agua. Esta fue calculada a partir de datos experimentales proporcionados en las placas de Richards. La medición consiste en saturar de agua las muestras de suelo y posteriormente someterlas a diferentes presiones, en la mide la humedad de equilibrio (Biel et. al., 2015). El exceso de agua drena hacia un depósito, a través de un plato de cerámica poroso denominado placa de Richards. Las muestras de suelo cambian de la saturación al contenido residual.

La tabla 2, indica los datos ingresados para el ajuste de la curva, por un lado, los valores de cada una de las réplicas y, por otro, los promedios de las 5 mediciones de presión. El

primer dato de la curva se consideró un valor atípico y fue descartado por reducir el ajuste de todos los modelos.

**Tabla 2.** Presión y contenido de agua para la curva de retención

°N	Presión		Contenido de agua [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]					
	kPa	cm H <sub>2</sub> O	1a	2a	3a	4a	5a	Promedio
1	0,1	1,02	0,53	0,61	0,53	0,52	0,53	0,54
2	0,3	3,06	0,50	0,50	0,50	0,49	0,50	0,50
3	1	10,20	0,49	0,48	0,49	0,48	0,48	0,48
4	3,2	32,63	0,46	0,46	0,47	0,46	0,46	0,46
5	6,3	64,24	0,44	0,43	0,44	0,43	0,43	0,43
6	10	101,97	0,44	0,43	0,44	0,43	0,43	0,44
7	30	305,9	0,40	0,40	0,41	0,42	0,41	0,41
8	200	2039,44	0,28	0,30	0,30	0,35	0,35	0,32
9	800	8157,76	0,15	0,15	0,17	0,21	0,24	0,187
10	1500	15295,80	0,13	0,13	0,15	0,19	0,22	0,17

Adicionalmente, el programa RETC cuenta con el módulo Rosetta, en el que se ingresa la información de nivel 5 que corresponde a la densidad aparente, el contenido de agua a presiones de 33 y 1500 cm H<sub>2</sub>O, así como los porcentajes de textura que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Porcentajes texturales para la columna de suelo

Textura del suelo	Porcentaje (peso/peso)
Arena	50,9%
Arcilla	26,6%
Limo	22,5%

### 3.4.2. Discretización del tiempo y del espacio

En la columna de suelo se realizaron dos riegos de 250 ml cada miércoles a las 10h00 am y a las 2h00 pm durante doce semanas. Sin embargo, esta simulación se realizó para 3 semanas, es decir, un total de 21 días. La siguiente tabla muestra la distribución del tiempo en segundos.

**Tabla 4.** Discretización del tiempo para la columna de suelo

Tiempo de discretización	Valores
Tiempo inicial (Initial time) (s)	0
Tiempo final (Final time) (s)	1814400
Intervalo de tiempo inicial (Initial time step) (s)	0,864
Intervalo de tiempo mínimo (Minimum time step) (s)	0,0864
Intervalo de tiempo máximo (Maximum time step) (s)	86400

En cuanto a la discretización del espacio la columna de 15,20 cm de altura fue dividida en 200 nodos con un espacio entre cada elemento de 0,076 cm, lo que permite obtener información independiente de presión por nodos.

### 3.4.3. Modelo de flujo estacionario

Las condiciones iniciales para este modelo se realizaron en términos de presión. Además, se considera los parámetros hidráulicos calculados en la curva de retención. En cuanto a las condiciones de contorno superior (*upper BC*) son de tipo 1 de Dirichlet o denominadas como flujo constante (*constant flux*), es decir, sin acumulación de agua en la superficie y, por tanto, la presión en la parte superior de la columna es cero. La condición de contorno inferior (*lower BC*) es dependiente del sistema y se denomina en inglés *seepage face*, e indica que el agua sale del medio poroso saturado del dominio del flujo hacia un límite insaturado, por lo cual la presión de succión aplicada fue de -200 cm H<sub>2</sub>O cuyo dato de flujo coincide con el flujo medido en la columna.

### 3.4.4. Modelo de flujo

Las condiciones iniciales de esta simulación de flujo son obtenidas a partir de la simulación de flujo en estado estacionario en términos de presión.

Las condiciones de contorno en la superficie (*upper BC*) dependen de la capacidad de infiltración del suelo, considerando que la tasa de riego excede la capacidad de infiltración. El agua se acumula sobre la columna formando una capa. Esta condición se representa mediante una condición de contorno con capa superficial (*atmospheric BC with surface layer*). La altura máxima que alcanzaría del agua sería de 8,81 cm producto de los 500 ml de riego en un día, reduciéndose conforme se infiltra con un flujo de 4,4053 cm/s.

Posteriormente se determinó la tasa de evaporación utilizando las medidas gravimétricas de agua retenida en la columna y recuperada a la salida de la misma, como se muestra a continuación:

**Tabla 5.** Condiciones de contorno para la columna de suelo

<b>Time (días)</b>	<b>Precipitación (cm/s)</b>	<b>Evaporación (cm/s)</b>
1,15E-05	4,4053	3,22E-06
0,16	0	3,22E-06
0,16	4,4053	3,22E-06
2	0	3,22E-06
6,99	0	2,22E-06
6,99	4,4053	3,14E-06
7,16	0	3,14E-06
7,16	4,4053	3,14E-06
8,99	0	3,14E-06
13,99	0	2,26E-06
13,99	0,44053	3,14E-06
14,16	0	3,14E-06
14,16	0,44053	3,14E-06
15,99	0	3,14E-06
21	0	2,58E-06

Las condiciones de contorno en el límite inferior del modelo (*lower BC*) son las mismas que se han utilizado en el modelo estacionario.

Adicionalmente, a 10 cm de profundidad del perfil del suelo se colocó un punto de observación, con la finalidad de calibrar los valores simulados con los medidos experimentalmente por un tensiómetro ubicado.

### **3.4.5. Modelo de transporte conservativo**

Las condiciones iniciales en término de presión a las diferentes profundidades son los valores obtenidos del modelo de flujo. Las condiciones de contorno superiores (*upper BC*) son de tipo 3 de Cauchy o también denominada concentración de flujo (*concentration flux BC*).



Las condiciones de contorno inferior (*lower BC*) son de tipo 2 de Neumann, también conocida como drenaje libre (*free drainage*), ya que el gradiente de concentración es cero. Los parámetros hidráulicos de calibración del modelo fueron la dispersividad longitudinal ( $\alpha_L$ ) y la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ).

### 3.5. Simulación de suelo enmendado con astillas de madera

#### 3.5.1. Parámetros hidráulicos

Un suelo enmendado no se encuentra dentro de un tipo de textura específico, por lo cual, se utilizó las funciones de PTF, para obtener los parámetros hidráulicos de las 12 texturas disponibles en Rosetta. Posteriormente, los resultados de estas simulaciones fueron comparadas, primero con los datos de presión del tensiómetro y segundo con el volumen de agua recuperado al final de la simulación.

Finalmente, se determina la textura que más se asemeja al comportamiento de la columna enmendada.

#### 3.5.2. Discretización del tiempo y del espacio

El riego para esta columna se realizó igual que para la columna de suelo. Sin embargo, esta simulación es de 28 días, es decir, 4 semanas.

Es importante mencionar, que existe una semana adicional de riego, ya que la simulación inició en el modelo de flujo de agua y no en el modelo estacionario como en la columna de suelo. Por este motivo con la finalidad evitar modificar los resultados simulados, se consideró una semana ficticia de riego. La tabla 6 indica la discretización del tiempo para esta columna.

**Tabla 6.** Discretización del tiempo para la columna enmendada

Tiempo de discretización	Valores
Tiempo inicial (Initial time) (s)	0
Tiempo final (Final time) (s)	2419200
Intervalo de tiempo inicial (Initial time step) (s)	0,864
Intervalo de tiempo mínimo (Minimum time step) (s)	0,0864
Intervalo de tiempo máximo (Maximum time step) (s)	86400

En cuanto a la discretización del espacio en el perfil del suelo, la columna de 17,80 cm de altura fue dividida en 200 nodos, es decir, que el espacio entre nodo es de 0,089 cm.

Además, se consideró la ubicación del tensiómetro como punto de observación a los 10 cm de la profundidad de la columna.

### 3.5.3. Modelo de flujo de agua

Las condiciones iniciales para este modelo, fueron las condiciones estacionarias sin succión que corresponde al valor de 0,089 cm H<sub>2</sub>O, de acuerdo a la discretización del espacio en la columna.

Las condiciones de contorno en la superficie (*upper BC*) son las mismas de las aplicadas en el modelo desarrollado para la columna de suelo. Las condiciones de contorno inferior (*lower BC*) se representan mediante la infiltración a través de una superficie (*seepage face*) con una succión máxima de -40 cm H<sub>2</sub>O.

Este valor de succión, inferior al establecido en la columna de suelo, ha sido calibrado para ajustar el flujo experimental calculado a través de medidas gravimétricas del volumen de agua.

Posteriormente, las tasas de riesgo y evaporación fueron calculadas siguiendo la metodología anteriormente descrita para la columna de suelo (Tabla 7).

**Tabla 7.** Condiciones de contorno para la columna enmendada

Time (días)	Time (hora)	PP (cm/s)	EV (cm/s)
1,15E-05	0,00027	4,4053	0
0,16	3,99	0	0
0,16	4	4,4053	0
0,99	23,95	0	0
6,99	167,94	0	1,88E-06
6,99	167,95	4,4053	0
7,16	171,94	0	0
7,16	171,95	4,4053	0
7,99	191,9	0	0
13,99	335,94	0	1,88E-06
13,99	335,95	0,44053	2,96E-06
14,16	339,94	0	2,96E-06
14,16	339,95	0,44053	2,96E-06
15,99	383,95	0	2,96E-06
20,99	503,94	0	2,16E-06

<b>Time (días)</b>	<b>Time (hora)</b>	<b>PP (cm/s)</b>	<b>EV (cm/s)</b>
20,99	503,95	0,44053	5,43E-06
21,16	507,94	0	5,43E-06
21,16	507,95	0,44053	5,43E-06
21,99	527,95	0	5,43E-06
28	672	0	1,84E-06

#### **3.5.4. Modelo de flujo estacionario**

Una vez definido la textura, los parámetros hidráulicos y la succión para simular la columna de suelo enmendado, se procedió a realizar la simulación en estado estacionario, con la finalidad de obtener las condiciones iniciales del modelo de flujo transitorio de agua.

Para esto se consideró que las condiciones de contorno superior (*upper BC*) se mantienen como en el modelo de la columna de suelo. Las condiciones de contorno inferior (*lower BC*) se representa mediante la infiltración a través de una superficie (*seepage face*) con succión máxima de -40 cm H<sub>2</sub>O.

Los datos de potencial de presión calculados en esta simulación se utilizan como condiciones iniciales en el modelo de flujo transitorio. Mientras que los valores de presión del agua calculados en el modelo de flujo transitorio se utilizarán para el modelo de transporte.

#### **3.5.5. Modelo de transporte conservativo**

Para determinar los parámetros hidráulicos de la columna se ha realizado un ensayo de trazador en el laboratorio. Esto consiste en inyectar un volumen de 500 ml de una disolución de Cl<sup>-</sup> como trazador a una concentración de 5cg/l. En este caso, la inyección se ha realizado de forma continua a través de una bomba peristáltica durante 1,15 días.

En la ventana de intervalos de tiempo de las condiciones de contorno (*time variable BC*), se establece el tiempo de inyección de agua con trazador que corresponde a un caudal de 0,3 ml/min o 8,81135E-05 cm/s de agua.

El volumen de agua drenada fue medida gravimétricamente a la salida de la columna mediante viales utilizando un auto muestreador. En todos los viales recogido se midió

la conductividad eléctrica y en algunos de ellos la concentración de  $\text{Cl}^-$ . Según los cálculos experimentales, toda la masa inyectada se recuperó después de 4,52 días. Además, la tasa de evaporación se calculó por diferencia del volumen real recuperado al final de la columna y del previsto según el flujo inyectado como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 8.** Condiciones de contorno en el modelo de transporte de la columna enmendada

<b>Time (hora)</b>	<b>PP (cm/s)</b>	<b>EV (cm/s)</b>	<b>cTop (mmol/ml)</b>
0,0027	8,81E-05	9,11E-06	0,067068
0,027	8,81E-05	9,11E-06	0,067068
14,5	8,81E-05	9,11E-06	0,067068
21,66	8,81E-05	9,11E-06	0,067068
27,77	8,81E-05	9,11E-06	0,067068
55,55	8,81E-05	9,11E-06	0
108,55	8,81E-05	9,11E-06	0

Las condiciones de contorno en la superficie de la columna (*upper BC*) y a la salida de la columna (*lower BC*) se mantienen como en la simulación de transporte de la columna de suelo.

Adicionalmente, el punto de observación se ubicó al final del perfil con el objetivo de registrar la salida del trazador de la columna. Los datos medidos en el punto de observación se utilizaron para calibrar el modelo.

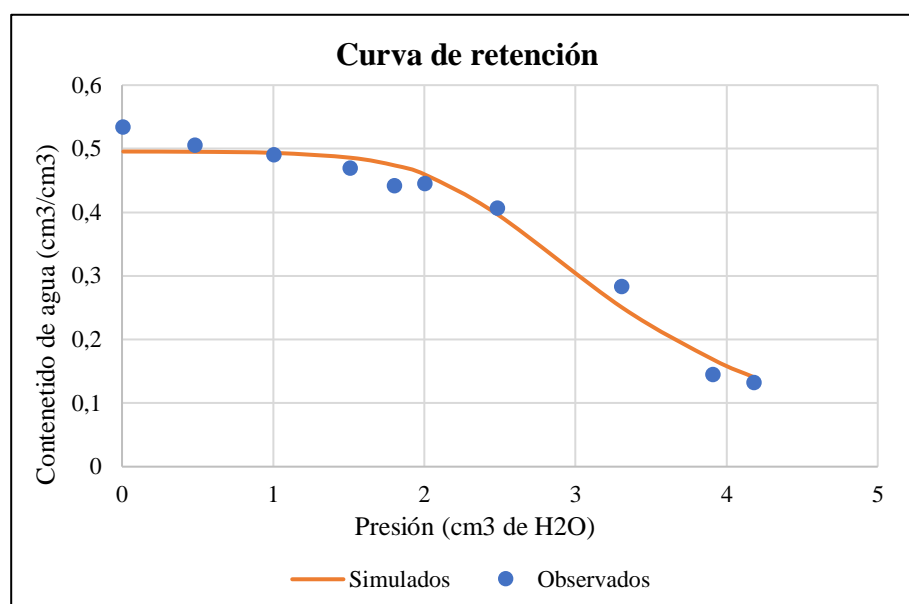
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Parámetros hidráulicos del suelo

#### 4.1.1 Curva de retención

De acuerdo a los porcentajes presentados en la tabla 3 y según el diagrama triangular de clases texturales del suelo realizado por departamento de agricultura de Estados Unidos (USDA) se trata de un suelo franco arcilloso arenoso.

En la figura 1, se observa la curva de retención con un error cuadrático medio (R2) calculado por RETC de 0,98, es decir, el modelo simulado es coincide con los datos observado, ya que la diferencia entre dichos datos es de 0,023%.



**Figura 1.** Curva de retención

Es importante recordar que los parámetros hidráulicos obtenidos de la curva de retención que se muestran en la tabla 9, fueron los valores de entrada en el modelo de flujo de agua de la columna de suelo. El contenido de saturación ( $\theta_s$ ) se midió experimentalmente en laboratorio y corresponde a un valor de  $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . El parámetro  $l$ , que representa la conectividad de poros, se fijó en  $-1$ , ya que según Schaap y Leij (2000) se considera un valor apropiado para la mayoría de las texturas de suelos (Radcliffe y Simunek, 2010).

**Tabla 9.** Parámetros hidráulicos de la columna de suelo

Parámetros	Valores
$\theta_r \text{ (cm}^3/\text{cm}^3\text{)}$	0
$\theta_s \text{ (cm}^3/\text{cm}^3\text{)}$	0,33
$\alpha$	0,0026
$n$	1,28302
$l$	-1

#### 4.2. Parámetros hidráulicos del suelo enmendado

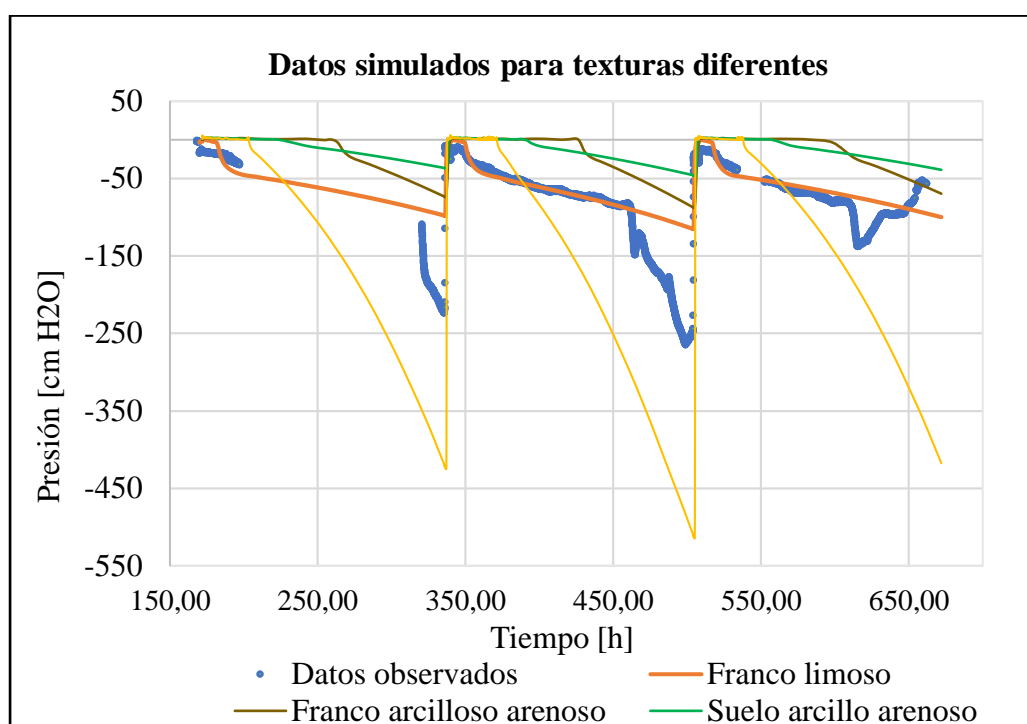
Los resultados más representativos de las distintas simulaciones texturales disponibles en Rosetta se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 10.** Parámetros hidráulicos de diferentes texturas para la columna enmendada

Parámetros	Franco limoso	Franco arcilloso arenoso	Arcillo arenoso	Arcilla
$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0,067	0,089	0,1	0,068
$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0,4296	0,4296	0,4296	0,4296
$\alpha$	0,002	0,01	0,027	0,008
Ks (cm/s)	1,25E <sup>-4</sup>	1,94E <sup>-5</sup>	3,33E <sup>-5</sup>	5,55E <sup>-5</sup>
n	1,41	1,23	1,23	1,09
l	-1	-1	-1	-1

Cabe mencionar, que para todas las simulaciones se consideró el contenido de agua saturado ( $\theta_s$ ) calculado en laboratorio y la conectividad entre poros (l) con el valor de -1, como se menciona en el apartado de suelo.

En la figura 2, se observa la calibración de los tensiómetros con las texturas más representativas:



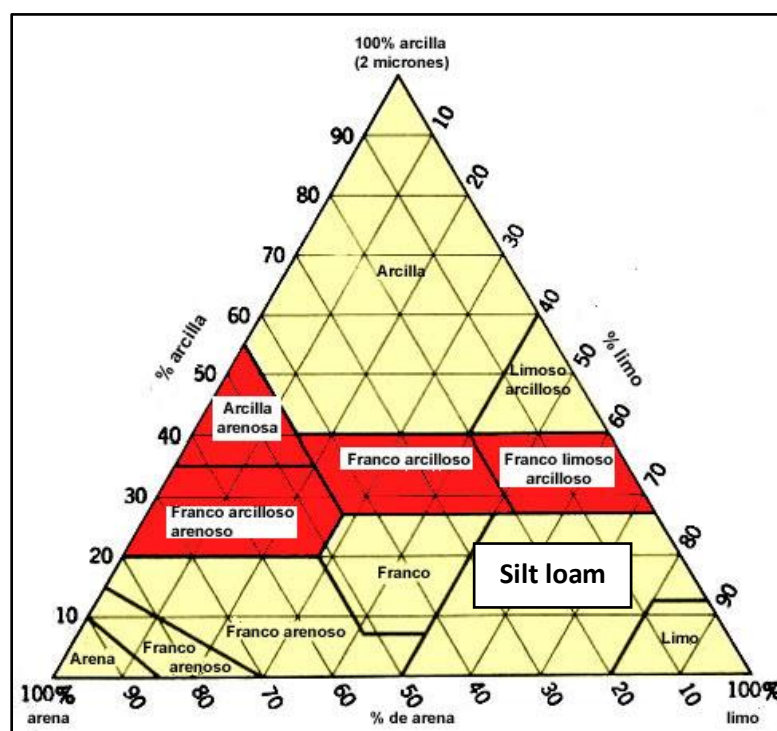
**Figura 2.** Tensiómetros calibrados con diferentes texturas

Los resultados de la tabla 11, muestran que las texturas de arcilla y franco limoso presentan menor diferencia con el volumen medido en laboratorio. Al comparar en términos de porcentaje representan el 4,22% y 4,31% respectivamente. Sin embargo, el suelo franco limoso concuerda con el tiempo de retención registrado por el tensiómetro

**Tabla 11.** Volumen de agua drenada con la Ks de Rosetta

Tipo de suelo	Ks (cm/s)	Volumen (ml)		
		Simulado	Experimental	Diferencia
Arcillo arenoso	3,33E-05	1280,16		61,69
Arcilla	5,55E-05	1285,22		56,63
Franco limoso arcilloso	1,94E-05	1281,74	1341,85	60,11
Franco limoso	1,25E-04	1283,18		58,67

El tipo de suelo franco limoso fue el que mejor simuló el comportamiento de la columna de suelo con astillas de madera. La figura 3, muestra los posibles porcentajes texturales que podría tener este suelo según la USDA.



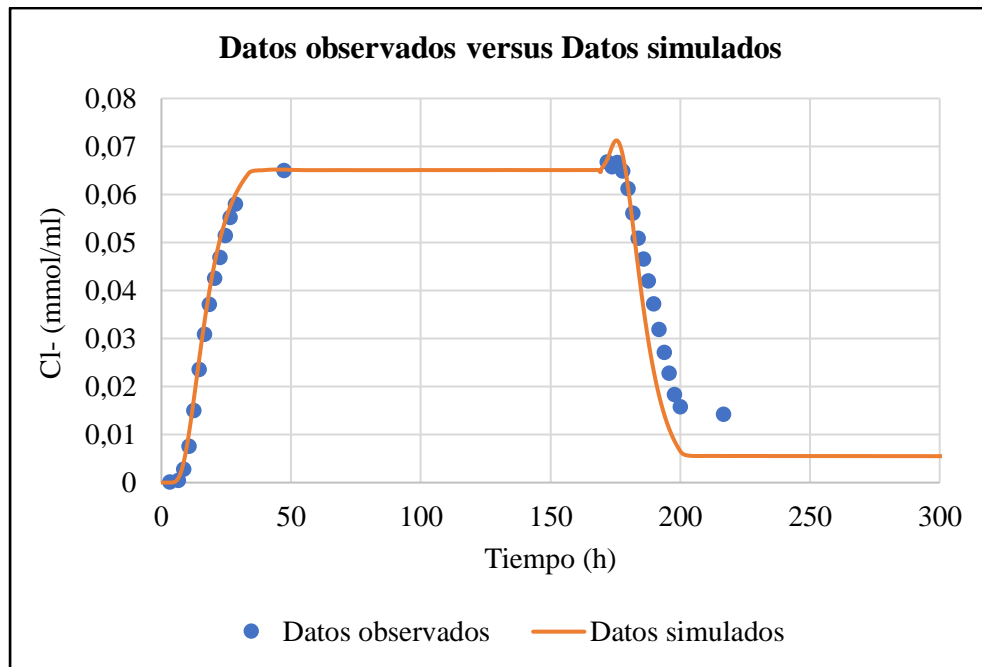
**Figura 3.** Diagrama triangular de las clases texturales (Tomado de FAO; 2019)

### 4.3. Transporte conservativo

#### 4.3.1. Trazador y dispersividad longitudinal

##### 4.3.1.1. Suelo

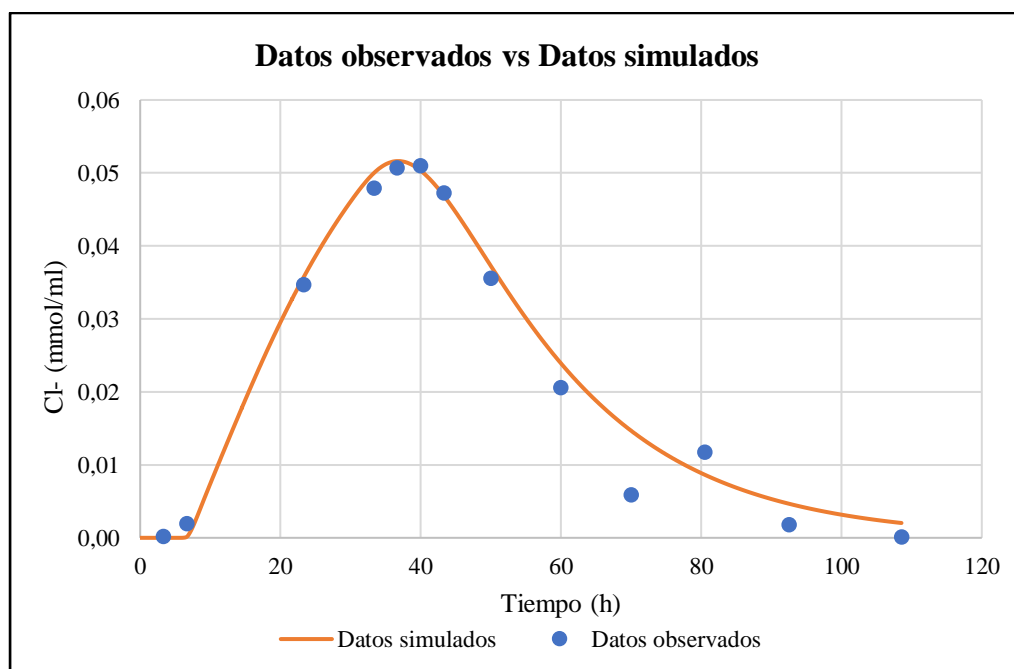
El modelo de transporte del trazador, se calibro con 1,5 cm de dispersividad longitudinal del medio poroso. La calibración tiene un  $R^2$  de 0,93, lo que indica que la diferencia entre los datos observados y los datos simulados es mínima. En el gráfico 4, se observa el ajuste logrado en la recuperación del trazador.



**Figura 4.** Calibración del trazador para la columna de suelo

#### 4.3.1.2. Suelo enmendado con astillas de madera

La dispersividad longitudinal calibrada para la columna de suelo enmendada es de 8,5 cm. El error cuadrático obtenido es de 0,98%, es decir, existe alta aproximación a los resultados recuperación de masa obtenida en laboratorio. En la gráfica 5, se muestra los datos simulados y los experimentales.



**Figura 5.** Calibración del trazador para la columna enmendada



Al comparar ( $\alpha_L$ ) de los dos modelos, se observa que en la columna de suelo es menor que en la columna de astillas. Esto puede estar asociado a la tortuosidad del medio, ya que, según Sánchez (2017), cuando los caminos que recorre el flujo son más anchos, es decir, menos tortuosos las moléculas avanzan más rápido. Además, cuando el flujo circula por el centro de los canales intergranulares se moviliza más rápido que al moverse cerca de los granos.

#### 4.3.2. Conductividad hidráulica saturada

##### 4.3.2.1. Suelo

La conductividad hidráulica en el modelo de flujo, previo al modelo de transporte es de  $1,64\text{E-}5$  cm/s. El volumen de agua total recuperado fue de 1289,81 ml. Si comparamos este volumen con el medido en el laboratorio (1280,57 ml), existe una diferencia despreciable de 9,24 ml que corresponde al 0,72% de variación. La siguiente tabla 12 muestra el volumen de agua simulado y medido:

**Tabla 12.** Volumen de agua drenado con Ks calibrada en el modelo de flujo

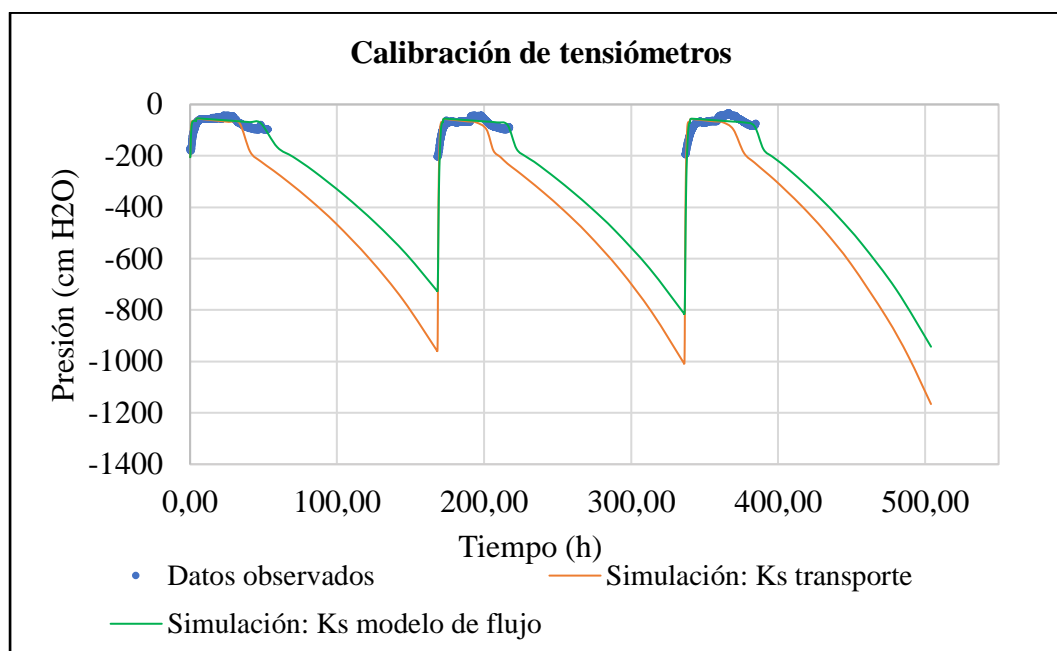
Tiempo		Volumen (ml) simulado	Volumen (ml) experimental
Días	Segundos		
2	172800	438,17	437,64
7	604800	20,24	-
9	777600	409,58	426,22
14	1209600	10,04	-
16	1382400	402,64	416,69
21	1814400	9,14	-
Total		1289,81	1280,57

En el modelo de transporte se calibró la Ks con  $2,48\text{E-}5$  cm/s y el volumen de agua recuperado es de 1298,95 ml. La diferencia con el drenaje (1280,57 ml) medido en laboratorio es de 18,38 ml, que representa el 1,41%. A pesar de esta diferencia en la tabla 13, se observa que los tiempos de retención coinciden con los datos experimentales.

**Tabla 13.** Volumen de agua drenado con Ks calibrada en el modelo de transporte

Tiempo		Volumen (ml) simulado	Volumen (ml) experimental
Días	Segundos		
2	172800	470,48	437,64
7	604800	0	-
9	777600	415,38	426,22
14	1209600	0	-
16	1382400	413,08	416,69
21	1814400	0	-
Total		1298,95	1280,57

Al comparar entre los resultados de las tablas 12 y 13, se observa que el volumen recuperado con la Ks calibrada en el modelo de transporte, incrementa con respecto a la obtenida en el modelo de flujo. Sin embargo, esta diferencia en términos de porcentaje es despreciable frente al volumen medido en laboratorio.



**Figura 6.** Calibración de tensiómetros con conductividad hidráulica para la columna de suelo

Además, en el tiempo de retención obtenido con la Ks del modelo de transporte coinciden con los con los observados en laboratorio, por lo tanto, es una mejor representación del modelo. En figura 6, se observan las calibraciones del tensiómetro con los datos simulados.

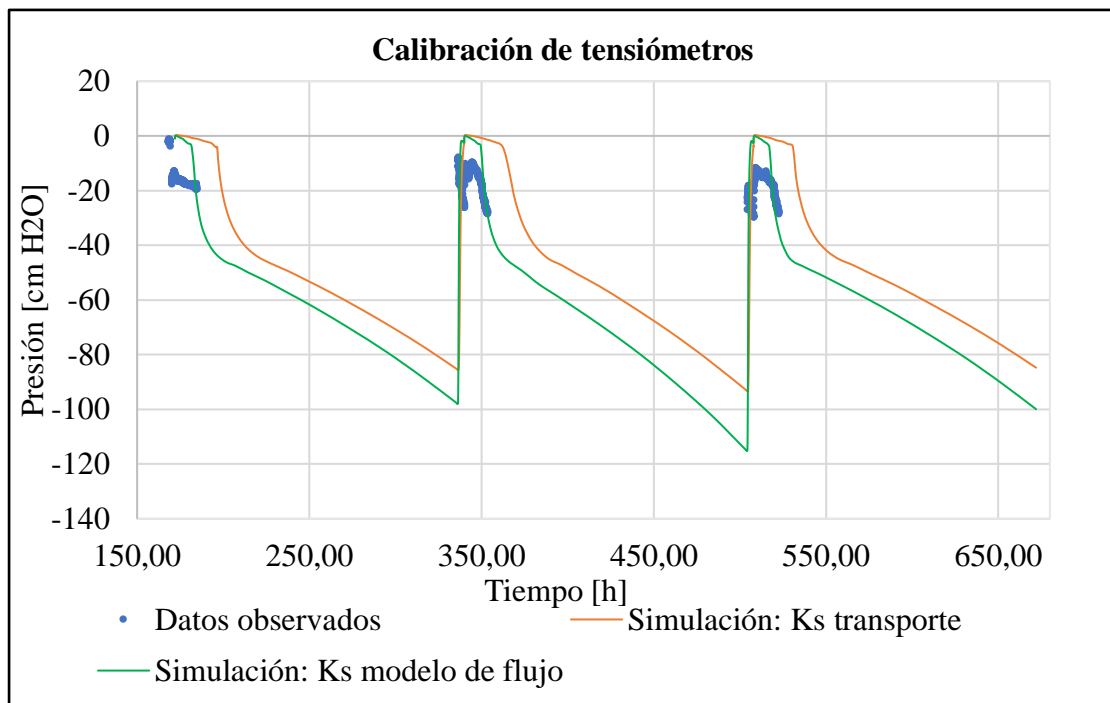
#### 4.3.2.2. Suelo enmendado con astillas de madera

La tabla 14, indica el volumen de agua recuperado con la conductividad hidráulica para la textura franco limosa:

**Tabla 14.** Volumen de agua drenado con Ks calibrada en el modelo de transporte

Día	Tiempo	Volumen (ml)	
	Segundos	Simulado	Experimental
14	1209600	443,13	478,95
21	1814400	427,40	441,55
28	2419200	411,46	421,35
<b>Total, de volumen</b>		<b>1281,99</b>	<b>1341,85</b>

La conductividad hidráulica determinada en el modelo de transporte para el suelo franco limoso es  $6,0E^{-5}$  cm/s. El volumen drenado con esta calibración es 1281,99 ml y la diferencia es de 59,86 ml de agua, que representa el 4,46% del experimental. Este porcentaje muestra que la diferencia de volumen es despreciable frente al medido.



**Figura 7.** Calibración de tensiómetros con conductividad hidráulica de la columna enmendada

En la figura 7 se observa la calibración de los tensiómetros con la conductividad calibrada en el modelo de flujo y en el modelo de transporte.

### 4.3.3. Tiempo de retención en las columnas

La columna de suelo tarda aproximadamente 38,4 h, es decir, 1,60 días en drenar el riego que corresponde a un día. En cuanto a la columna enmendada en alrededor de 45,76 h, es decir, 1,90 días, se ha recuperado el volumen de riego.

En la figura 4 y 5 que corresponde al modelo de transporte de la columna de suelo y suelo con astillas respectivamente, se observa que el tiempo promedio de llegada es de 17,21 h para la columna de suelo y para la columna enmendada corresponde a 18,19 h.

## 4.4. Eliminación de nutrientes

### 4.4.1. Nitrógeno

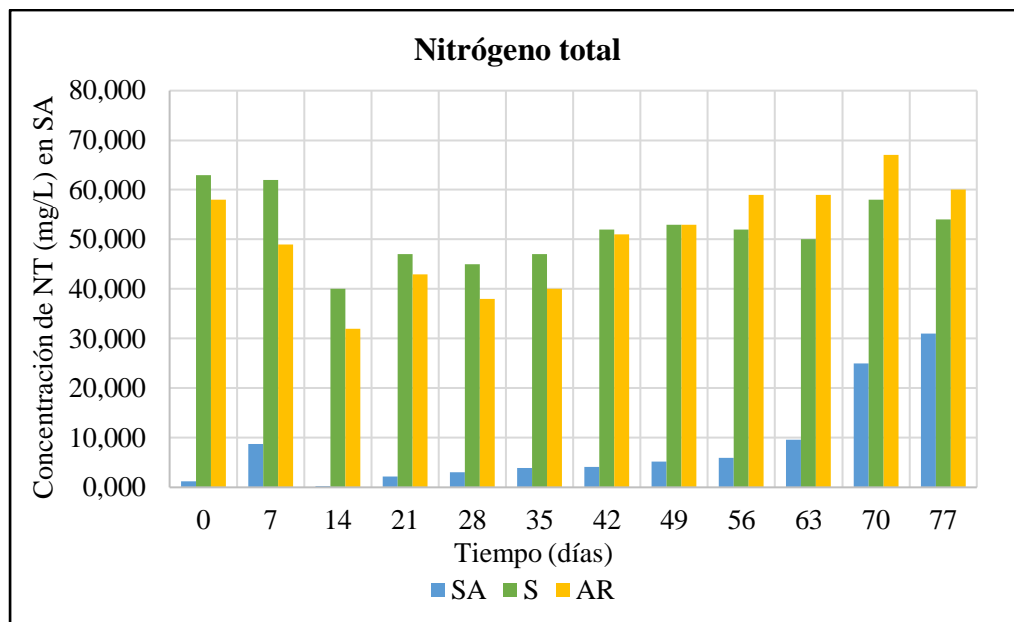
La tabla 15, muestra la concentración promedio de la calidad del agua residual y de los efluentes de las columnas:

**Tabla 15.** Calidad del influente y efluentes (nitrógeno)

Compuesto de fósforo	Concentración media (mg/L)		
	AR	S	SA
Nitrógeno total (NT)	50,75	51,92	8,35
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	38,72	0,21	0,21
NO <sub>3</sub> -N	0,16	50,19	7,10
DQO	107,67	14,98	32,14

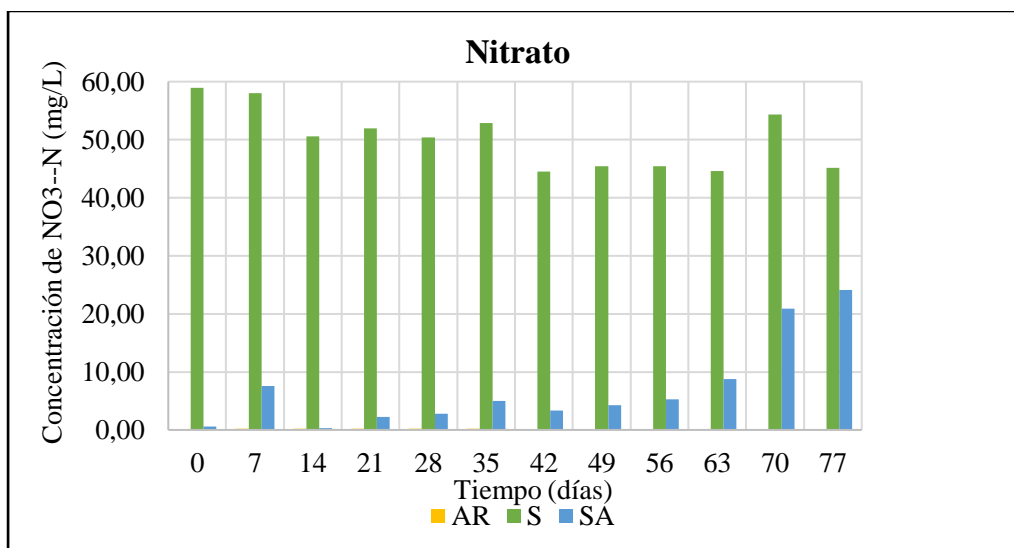
En la tabla 15 se observa que el NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, es la principal fuente de nitrógeno en el agua residual. Sin embargo, el porcentaje de atenuación de amonio para las dos columnas experimentales es de 99,46%, independientemente de la presencia de astillas de madera.

En cuanto a la concentración de NT, incrementó en 2,25% en la en la columna de suelo y redujo en 83,54% en la columna enmendada. Estos resultados indican, que la presencia de astillas es altamente eficaz para la eliminación de nitrógeno, como se muestra en la figura 8.



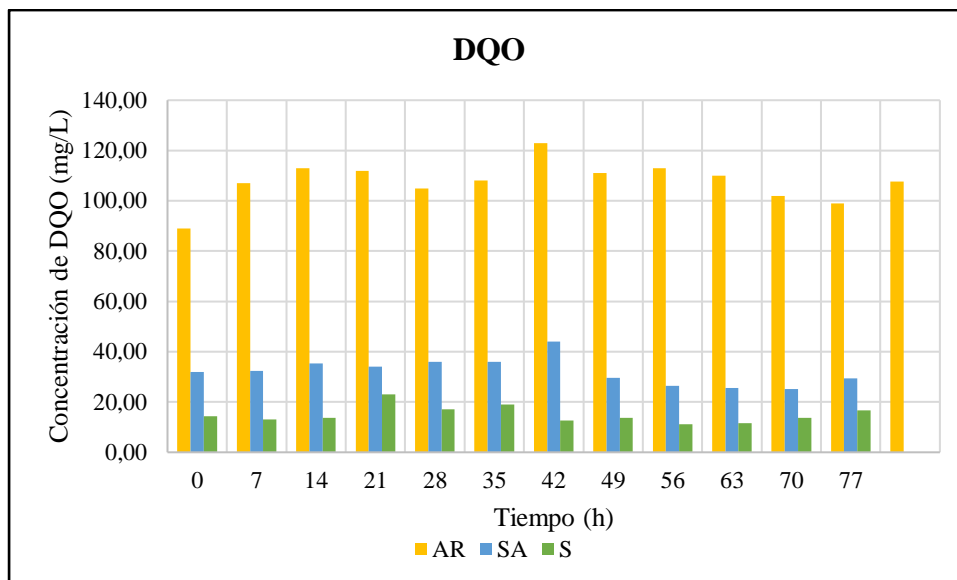
**Figura 8.** Concentración de nitrógeno total influente y efluentes

En la figura 9, se observa que la concentración de  $\text{NO}_3\text{-N}$  en el efluente de la columna suelo es superior en 99,67% al influente. Este ascenso justifica la alta concentración de NT, ya que está asociado a la transformación de amonio a nitrato en este efluente. En el caso de la columna enmendada también existe incremento en 97,64%.



**Figura 9.** Concentración de nitrato en influente y efluentes

Es importante mencionar que la concentración de DQO se reduce en las dos columnas, principalmente en la de suelo con 86,09%, mientras que en la columna enmendada desciende en 70,15%, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 10.** Concentración de DQO en influente y efluentes

#### 4.4.2. Fósforo

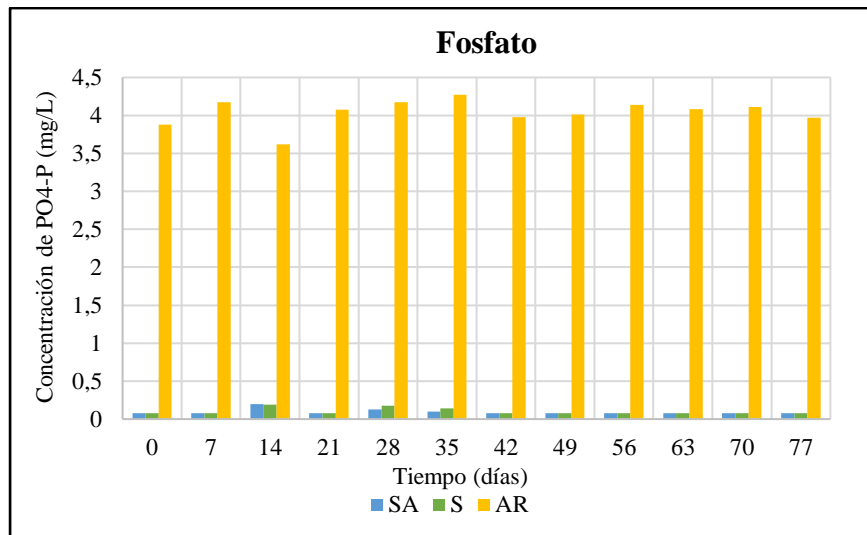
En los efluentes de las dos columnas existe descenso en la concentración de fósforo. Esta reducción se evidencia independientemente de la presencia de astillas, como se muestra a en la siguiente tabla:

**Tabla 16.** Calidad del influente y efluentes (fósforo)

Compuesto de fósforo	Concentración media (mg/L)			Eliminación (%)	
	AR	S	SA	S	SA
Fósforo total (PT)	4,96	0,16	0,15	96,75	96,93
PO <sub>4</sub> -P	4,04	0,104	0,096	97,43	97,61

La tabla 16 indica que la eliminación de PT es similar para los dos efluentes, ya que para la columna (S) es de 96,75% y 96,93% para la columna enmendada.

Cabe mencionar, que la mayor concentración de PT está relacionada con la presencia de PO<sub>4</sub>-P. Estas concentraciones a partir de los 42 días son constantes con 0,0815 mg/L, para ambas columnas como se muestra en el gráfico 11.



**Figura 11.** Concentración de fosfato en influente y efluentes

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Modelo de flujo y transporte conservativo

Los parámetros hidráulicos de entrada para el modelo de flujo de la columna de suelo, fueron calculados mediante la curva de retención en el programa RETC. Según Patil y Rajput (2009), menciona la importancia de tener los valores de la curva de retención previo a realizar cualquier modelación hidrológica, ya que ajusta la simulación a los datos experimentales. Esto se comprueba en el presente trabajo, ya que la columna enmendada no cuenta con esos valores, lo que genera una sobre estimación en cada etapa de riego, como se evidencia en la gráfica 7.

La conductividad hidráulica calibrada en el modelo de transporte es la definitiva para las dos columnas, ya que según varios autores como: Akyürek et. al., (2004); Rubio y Poyatos (2012); Mahapatra y Jha (2018), determinaron en sus trabajos de investigación, que Rosetta sobreestima la  $K_s$  para algunas texturas, sobre todo cuando el nivel de información es menor. Además, Rubio y Poyatos (2012), comprobaron que Hydrus es incapaz de predecir presiones cuando no existe eventos de lluvia. Esto se evidencia en las gráficas 6 y 7 del presente trabajo, en el que se demuestra que los eventos sin riego o ciclos de secado no concuerdan entre las presiones simuladas y los observadas.

Además, la conductividad hidráulica calibrada en el modelo de transporte para la columna de suelo no enmendada (franco arenoso arcilloso) es de  $2,48E^{-5}$  cm/s. En el trabajo de Alvarez et. al., (2012), se determinó la  $K_s$  para este tipo de suelo a través Rosetta y en campo. Los valores de campo fueron obtenidos mediante el análisis de 13

muestras de diferentes lugares, lo que permitió establecer un rango de conductividad hidráulica de  $5,0\text{E}^{-6}$  cm/s a  $1,04\text{E}^{-4}$  cm/s. Esto significa que la calibración obtenida para esta columna es adecuada conforme los datos reales de campo.

En cuanto a la columna enmendada representada por la textura franco limosa tiene una  $K_s$  de  $6,0\text{E}^{-5}$  cm/s. Dentro de los trabajos de modelización realizados por Rubio y Poyatos (2012), se establece los valores medidos en campo para dicha textura. Estos valores se encuentran en un rango  $1,3\text{E}^{-3}$  cm/s a  $8,1\text{E}^{-5}$  cm/s. Lo que demuestra que la calibración realizada para este tipo de suelo se encuentra dentro de los de  $K_s$  acorde a la textura.

Es importante mencionar, que la conductividad hidráulica para este suelo enmendado es mayor que para el suelo sin modificar. Esto concuerda con el trabajo realizado por Shaygan et. al., (2018), comprueba que la columna mezclada con astillas de madera, incrementa la porosidad y el volumen de macroporos, por tanto, la conductividad hidráulica es mayor.

La dispersividad longitudinal para la columna de suelo es menor que para la columna enmendada, como se explicó en los resultados. Este incremento se relaciona con la tortuosidad, ya que la columna enmendada es heterogénea. Según Gelhar et al. (1985) (en Gómez, 2016), menciona que la dispersividad es alrededor del 10% de la distancia que recorre el contaminante. Lo cual se cumple para la columna de suelo, ya que la dispersividad es de 1,5 para una longitud de 15,20 cm.

Sin embargo, para la columna enmendada esto no se cumple, ya que se considera un medio heterogéneo y más tortuoso. Esto concuerda con el trabajo de Ii (1994), quién comenta que la presencia de grietas y heterogeneidades genera una mayor dispersividad longitudinal.

En cuanto al tiempo promedio de llegada del trazador para la columna de suelo es de 17,21 h y para la columna enmendada es de 18,17 h. Según Meffe (2016), los tiempos promedio de llegada de trazador para la columna de suelo es de 7,81 días y para la columna enmendada es de 9,73 días. Estos valores no se aproximan a los obtenidos en esta simulación. Sin embargo, Meffe (2016), también menciona que el tiempo de retención depende del contenido de humedad, es decir, mayores tiempos de retención



corresponden a mayores contenidos de agua, lo cual puede ser el caso de la columna enmendada.

### **5.1. Eliminación de nutrientes**

La figura 8, evidencia un alto porcentaje de atenuación de NT en la columna enmendada. Esto se compara favorablemente con el estudio realizado por Ruane et. al., (2011), quien utilizó filtros de astillas de madera en un medio anaeróbico, con la finalidad de minimizar el contenido de materia orgánica y nitrógeno. De estos filtros se logró la reducción de NT en 57% del influente. Esto indica la eficiencia de las astillas de madera, ya que la columna de suelo no evidencia descensos en esta concentración.

En cuanto al  $\text{NH}_4^+$ , en la tabla 15 se evidencia un descenso de concentraciones en las dos columnas. Esta reducción se debe a los procesos de nitrificación, es decir, la transformación de amonio en nitratos. En la columna de suelo esta conversión se ve reflejada en el NT y en la columna enmendada se evidencia un descenso. Este descenso está asociado a los procesos de desnitrificación, que consiste en la reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso. Estos resultados son comparables con la investigación realizada por Meffe (2016), ya que indica que la columna de suelo presenta aumento nitratos y reducción de amonio, lo que indica la ocurrencia de nitrificación. Mientras que para la columna enmendada con astillas de madera explica la existencia de procesos de nitrificación en las superficies y desnitrificación en las partes más profundas de la columna.

En el gráfico 10, se evidencia menor concentración de DQO en el efluente de la columna de suelo, que en la columna enmendada. Estos valores son mayores a los obtenidos el estudio realizado por Meffe et. al., (2016), con valores de eliminación del DQO de 60,4% para la columna de suelo y de 28,0% para la columna enmendada. Sin embargo, como menciona Schipper et. al., (2010a) (en Meffe et. al., (2016), que uno de los efectos adversos del uso de material vegetal puede generar liberación de carbono orgánico. A pesar del 70,15% de reducción de DQO en el efluente, el menor porcentaje de eliminación de la columna enmendada frente a la columna de suelo podría estar relacionado con una carga mayor de carbono a tratar por el aporte de las astillas de madera.

En los efluentes de las dos columnas se evidencia descenso en la concentración de fósforo, independientemente de la presencia de astillas de madera. Esto posiblemente esta atribuido a la retención de fosfato a las arcillas del suelo. Según la discusión de Healy et al. (2010) (en Ruane, 2011), al comparar la efectividad de la adsorción de fósforo entre las astillas de madera y la arena, obtuvo que las astillas tienen una mayor capacidad adsorción. Sin embargo, en este trabajo al comparar entre las dos columnas se determina que la mayor eficiencia tiene los coloides del suelo. Además, esta reducción de concentraciones puede estar relacionado con la presencia de Ca, ya que según Meffe (2016), en su estudio menciona que la presencia de calcio genera precipitados con el fosfato, provocando descenso en la concentración de FT en el efluente de la columna emendada con astillas de madera.

## 6. CONCLUSIONES

- Los parámetros de la curva de retención de suelo son importantes para las modelizaciones hidrológicas, ya que permiten una mejor aproximación o ajuste a los datos experimentales o de campo.
- Las texturas que mejor reflejaron el comportamiento hidráulico de un suelo enmendado con astillas de madera fue el suelo franco limoso.
- La adición de enmiendas al suelo modifica las propiedades hidráulicas iniciales, tales como: porosidad, conductividad hidráulica, capacidad de retención de agua, dispersividad longitudinal, entre otras.
- La dispersividad longitudinal para un suelo enmendado aumenta, ya que es un medio más heterogéneo y la tortuosidad es mayor.
- La presencia de astillas de madera mejora la calidad del agua de los efluentes, principalmente en la atenuación de nitrógeno, debido a que actúa como fuente de energía para la actividad microbiana, favoreciendo los procesos de nitrificación y desnitrificación.
- La capacidad de adsorción de fósforo a los coloides del suelo reduce la concentración en los efluentes, independientemente de la presencia de astillas de madera.
- Los tiempos de retención en la columna de suelo enmendado es mayor, que en un suelo sin modificar. Esta diferencia se relaciona con el contenido de agua en la columna.
- El programa Hydrus ha permitido determinar las características hidráulicas de las columnas para la calibración y simulación del modelo de flujo y el transporte de un trazador. Sin embargo, los resultados son más aproximados a la realidad al utilizar el programa RECT, para determinar los parámetros de la curva de retención, como se realizó en este estudio para la columna de suelo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C., Lascano, R., & Stroosnijder, L. (septiembre de 2012). Test of the Rosetta pedotransfer function for saturated hydraulic conductivity. Obtenido de Scientific Reserach: <https://core.ac.uk/download/pdf/29226166.pdf>
- Álvarez, F. (Octubre de 2000). *Filtros verdes. Un sistema de depuración ecológico*. Obtenido de PAHO: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd19/collazo/filtverd.pdf>
- Apey, A. (31 de Agosto de 2009). *Contaminación de Aguas Subterráneas: Determinación del Coeficiente de Dispersión Mediante el Uso de Trazadores Conservativos*. Obtenido de Universidad de Chile: [http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/apey\\_a/sources/apey\\_a.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/apey_a/sources/apey_a.pdf)
- Biel, M., Valdes, J., Tamoh, K., Corada, C., & Candela, L. (Noviembre de 2015). *Comparación y validación de las propiedades hidráulicas del suelo mediante diferentes equipos de laboratorio*. Obtenido de Researchgate: [https://www.researchgate.net/publication/284438128\\_Comparacion\\_y\\_validacion\\_de\\_las\\_propiedades\\_hidraulicas\\_del\\_suelo\\_mediante\\_diferentes\\_equipos\\_de\\_laboratorio](https://www.researchgate.net/publication/284438128_Comparacion_y_validacion_de_las_propiedades_hidraulicas_del_suelo_mediante_diferentes_equipos_de_laboratorio)
- Catalán, J. (1997). *Depuradoras: bases científicas*. Madrid: Bellisco Libreria Editorial.
- FAO. (24 de Mayo de 2019). *Texturas del suelo*. Obtenido de [http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)
- Fuentes, W., & González, O. (Junio de 2007). *Estimación de la mineralización neta de nitrógeno del suelo en sistemas agroforestales y a pleno sol en el cultivo del café (coffea arabica l.), en el pacífico de nicaragua, departamento de carazo*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA: <http://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnp34f954.pdf>
- García, C., Pachepsky, Y., & Martín, M. (5 de diciembre de 2017). *Saturated Hydraulic Conductivity and Textural Heterogeneity of Soils*. Obtenido de Hydrology and Earth System Sciences: [http://oa.upm.es/50314/1/INVE\\_MEM\\_2017\\_273503.pdf](http://oa.upm.es/50314/1/INVE_MEM_2017_273503.pdf)
- Gomez, M. (Agosto de 2016). *Estimación de parámetros de transporte y mecanismos que gobiernan su respuesta frente a la contaminación: caso de estudio de un acuífero poroso clástico*. Obtenido de Scielo: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222016000200339#B20](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222016000200339#B20)
- Ii, H. (12 de Septiembre de 1994). *Effective porosity and longitudinal dispersivity of sedimentary rocks determined by laboratory and field tracer tests*. Obtenido de Springer: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00767863>
- Mahapatra\*, S., & Jha, M. (24 de Julio de 2018). *On the estimation of hydraulic conductivity of layered vadose zones with limited data availability*. Obtenido de

- Martínez, P., Martínez, P., & Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrología*. Madrid: Grupo Mundi-Prensa.
- Meffe, R., Miguel, A., Martínez, V., Lillo, J., & Bustamante, I. (2016). *Soil amendment using poplar woodchips to enhance the treatment of wastewater-originated nutrients*. Madrid: Journal of Environmental Management.
- Meffe, R., Miguel, Á., Martínez, V., Lillo, J., & Bustamante, I. (2016). *Soil amendment using poplar woodchips to enhance the treatment of wastewater-originated nutrients*. Madrid: ELSEVIER.
- Ortega, E., Salas, J., Ferrer, Y., Sobrados, L., & Aragón, C. (2008). *La depuración de las aguas residuales en pequeñas poblaciones Españolas*. Obtenido de Researchgate:  
[https://www.researchgate.net/profile/Juan\\_Salas7/publication/237106183\\_LA\\_DEPURACION\\_DE\\_LAS\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_EN\\_PEQUENAS\\_POBLACIONES\\_ESPANOLAS/links/0f3175343c72ba90fb000000/LA-DEPURACION-DE-LAS-AGUAS-RESIDUALES-EN-PEQUENAS-POBLACIONES-ESPANOLAS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Juan_Salas7/publication/237106183_LA_DEPURACION_DE_LAS_AGUAS_RESIDUALES_EN_PEQUENAS_POBLACIONES_ESPANOLAS/links/0f3175343c72ba90fb000000/LA-DEPURACION-DE-LAS-AGUAS-RESIDUALES-EN-PEQUENAS-POBLACIONES-ESPANOLAS.pdf)
- Pachepsky, Y., & Park, Y. (Mayo de 16 de 2005). *Saturated hydraulic conductivity of us soils grouped according to textural class and bulk density*. Obtenido de Researchgate:  
[https://www.researchgate.net/profile/Yakov\\_Pachepsky2/publication/281761283\\_Saturated\\_Hydraulic\\_Conductivity\\_of\\_US\\_Soils\\_Grouped\\_According\\_to\\_Textural\\_Class\\_and\\_Bulk\\_Density/links/56eb341908aeb65d7593b739.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yakov_Pachepsky2/publication/281761283_Saturated_Hydraulic_Conductivity_of_US_Soils_Grouped_According_to_Textural_Class_and_Bulk_Density/links/56eb341908aeb65d7593b739.pdf)
- Patil, N., & Rajput, G. (3 de Junio de 2009). *Evaluation of water retention functions and computer program “Rosetta” in predicting soil water characteristics of seasonally impounded shrink–swell soils*. Obtenido de Ascelibrary:  
<https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000007>
- Radcliffe, D., & Simunek, J. (2010). *Soil Physics with Hydrus Modeling and Applications*. Taylor & Francis Group.
- Ruane, E. M., Murphy, P., Healy, M., & French, P. (30 de Septiembre de 2011). *On-farm treatment of dairy soiled water using aerobic woodchip filters*. Obtenido de ELSEVIER:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135411005859>
- Rubio, C., & Poyatos, R. (1 de Febrero de 2012). *Applicability of Hydrus-1D in a Mediterranean Mountain Area Submitted to Land Use Changes*. Obtenido de Hindawi: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/375842/#B61>
- Sánchez, J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Salamanca.
- Sarki, A., Saffar, M., Asghar, A., Muhammad, S., & Latif, A. (2014). *Determination of saturated hydraulic conductivity of different soil texture materials*. Obtenido de Journal of Agriculture and Veterinary Science:

<https://pdfs.semanticscholar.org/23cc/df56d0dca656c22a84d509e90c89865550bd.pdf>

- Shaygan, M., Baumgartl, T., & Reading, L. (Enero de 2018). *The effect of soil physical amendments on reclamation of a saline-sodic soil: simulation of salt leaching using HYDRUS-1D*. Obtenido de Researchgate: [https://www.researchgate.net/publication/328884794\\_The\\_effect\\_of\\_soil\\_physical\\_amendments\\_on\\_reclamation\\_of\\_a\\_saline-sodic\\_soil\\_Simulation\\_of\\_salt\\_leaching\\_using\\_HYDRUS-1D](https://www.researchgate.net/publication/328884794_The_effect_of_soil_physical_amendments_on_reclamation_of_a_saline-sodic_soil_Simulation_of_salt_leaching_using_HYDRUS-1D)
- Tombul, M., Akyürek, Z., & Sorman, Ü. (2004). *Determination of soil hydraulic properties using pedotransferfunctions in a semi-arid basin, Turkey*. Obtenido de Researchgate: [https://www.researchgate.net/publication/29626740\\_Research\\_NoteDetermination\\_of\\_soil\\_hydraulic\\_properties\\_using\\_pedotransfer\\_functions\\_in\\_a\\_semi-arid\\_basin\\_Turkey](https://www.researchgate.net/publication/29626740_Research_NoteDetermination_of_soil_hydraulic_properties_using_pedotransfer_functions_in_a_semi-arid_basin_Turkey)
- Van Genuchten. (19 de Mayo de 1980). *A Closed form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils* . Obtenido de [http://people.ucalgary.ca/~hayashi/glgy607/reading/van\\_Genuchten1980.pdf](http://people.ucalgary.ca/~hayashi/glgy607/reading/van_Genuchten1980.pdf)
- Whitmire, S., & Hamilton, S. (12 de Octubre de 2005). *Rapid removal of nitrate and sulfate in freshwater wetland sediments*. Obtenido de ACSESS DL: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/34/6/2062>